



ISSN: 1306-3111

e-Journal of New World Sciences Academy
2012, Volume: 7, Number: 1, Article Number: 3A0044

NWSA-PHYSICAL SCIENCES

Received: July 2010
Accepted: January 2012
Series : 3A
ISSN : 1308-7304
© 2010 www.newwsa.com

Melek Baykal
İbrahim Karaca
Nigde University
ikaraca38@hotmail.com
Nigde-Turkey

Zn İLAVESİNİN BiPbSrCaCuO SÜPERİLETKENLERİNİN MİKROSERTLİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİLERİ

ÖZET

Maddenin mekanik özellikleri ve süperiletkenlik üzerine yapılan ön çalışmadan sonra, BiPbSrCaCuO süperiletkenin sertlik ölçümü Vickers sertlik testi kullanılarak yapılmıştır. HV değerlerinin %3, 5 ve 8 %Zn ilavesiyle ciddi bir şekilde etkilenmediği, ilave oranının %10'dan %50'ye kadar artmasıyla birlikte HV değerinin arttığı bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Zn ilavesi, Vickers Sertlik, Süperiletken, Mikrosertlik, BiPbSrCaCuO

EFFECTS OF THE Zn ADDITION ON THE MICROHARDNESS PROPERTIES OF THE BiPbSrCaCuO SUPERCONDUCTORS

ABSTRACT

After studying the preparatory subject areas about the mechanical properties of materials and the superconductivity, in our original research, we have investigated the changes in the microhardness of the superconducting BiPbSrCaCuO bulk material with addition of different molar percentages of Zn, using Vickers Hardness test. In our research, we have found that addition of Zn in small percentages like 3, 5 and 8% the HV values do not change significantly, but as the Zn percentage range increases from 10% up to 50% the value of HV values also increases.

Keywords: Zn addition, Vickers Hardness, Superconductor, Microhardness, BiPbSrCaCuO

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sertlik testi, metaller ve diğer numunelerin özelliklerinin araştırılmasında oldukça güvenilir ve yaygın olarak günümüzde de kullanılmaktadır. Numunelerin sertliği genellikle sürekli bir bataca karşı gösterilen direnç olarak ifade edilir. Genel olarak bir batac metalin yüzeyine baskı uyguladığında belirli yüklerin belirli zamanlarda uygulanmasıyla oluşan iz derinliğinin büyüklüğünün ölçümüdür.

Sertlik, bir numunenin kendisine batmaya çalışan daha sert bir numuneye karşı göstermiş olduğu direnç olarak tanımlanır. Sertlik izafi bir ölçü olup sürtünmeye, çizmeğe, kesmeğe ve plastik deformasyona karşı direnç olarak da tarif edilir. Laboratuvarlarda özel cihazlarla yapılan sertlik ölçümlerindeki değer, numunenin plastik deformasyona karşı gösterdiği dirençtir.

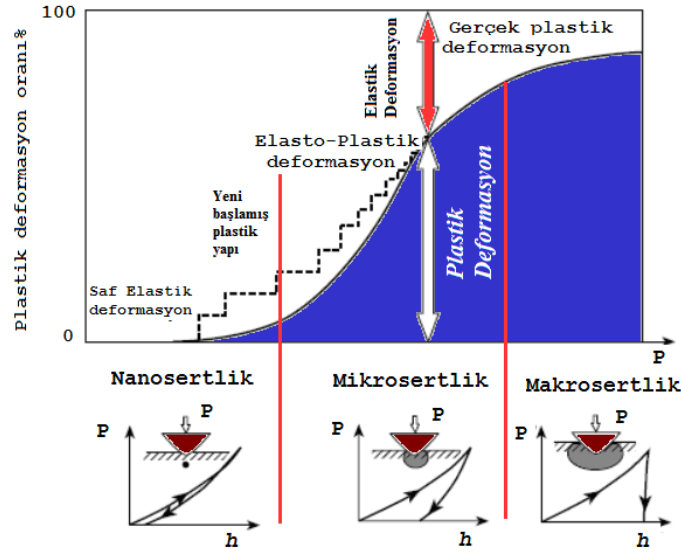
Sertlik testi ölçüm prensiplerinin amacına uygun numune seçimi veya kısmi uygulamalar için hangi numunenin seçilmesi gerektiği önemlidir. Bu konu için metal veya alaşımlarda sertlik testi yapılırken hangi metodun seçileceği de önem kazanmaktadır. Sertlik testi niçin bu kadar değerlidir? Genellikle, sertlik testi numunelerin diğer özelliklerinin yanında var olan ilişkileri açıkladığı için önemlidir. Örneğin, sertlik testi ve gerilim testi bir metal için plastik akışa karşı gösterilen direnci ölçer. Bu sebepten testlerin her ikisinde de sonuçlar bir birine oldukça paralel yakınlıktadır. Sertlik testinin tercih edileme sebebi kolay ve nispeten yıkıcı olmayan bir test olmasıdır.

Pratikte sertlik iki sınıfa ayrılır: makrosertlik ve mikrosertlik. Makrosertlik, 1kg veya daha fazla yük uygulanmasıyla yapılan testi belirtir. Mikrosertlik ise 0.0125 mm'den daha ince numunelerde 1 kg'dan az yük uygulanmasıyla yapılan testtir. Bu yüzeysel sertleştirilmiş, yüzeyi düzleştirilmiş numunenin her bir parçasının ayrı ayrı incelendiği oldukça küçük parçalar üzerinde yapılır [1].

Numunelerin yerel mekanik özelliklerinin incelenmesinde parçacık boyutuna bağlı olarak karakteristik iz boyuna göre yaygın olarak kullanılan sınıflandırma Makroiz, Mikroiz, Nanoiz ve Pikoiz şeklinde verilir [2].

Numunelerdeki deformasyon iki farklı yolla gerçekleşir: elastik (tersinir) ve plastik (tersinmez-kalıcı). Elastik deformasyon, angstrom ölçeğinde ($1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$) gerçekleşen tersinir işlemdir yani cisim üzerine etki eden kuvvet ortadan kaldırıldığında cisim başlangıçtaki ilk haline geri dönmesi durumudur. Bu sebeple başlangıçta bir kusura sahip olmadıkça elastik deformasyon büyüklük bağımlılığı göstermez[3]. Plastik deformasyon tepkisi, mikron veya daha aşağı aralıklardaki kusur boyutlarında, büyüklük etkileri belirgin olduğunda dislokasyon gibi hareket kusurları oluştuğu zaman oluşur.

Son yıllarda mekanik testlerde yaygın olarak, derinliğe duyarlı iz testi(*depth sensing indentation*), sürekli kaydedilebilen iz testi(*continuous recording indentation*) ve nanoiz veya oldukça düşük yük iz testi (*nanoindentation or ultra low load indentation*) testleri kullanılmaktadır. Bu testlerde yüksek çözünürlüklü cihazlarla sürekli bir kontrol sağlanır ve bir bataca ait yük ve yerdeğiştirme sürekli görüntülenip kaydedilebilir. Nanometrik ölçekte mekanik davranışların karakterizasyonunda kullanılan bu metod 1992 yılında elastik ve sertlik modülünün ölçümüyle ortaya çıkmıştır[1].



Şekil 1. Bir bataç tarafından numune üzerinde oluşan plastik deformasyonun artan yüke göre değişimi ve numuneye batacın girme basamaklarının değişiminin şematik gösterimi, h batacın numuneye girme derinliğini göstermektedir[2].

(Figure 1. Schematic diagram illustrating the change in the plastic deformation due to the formation of a typical indentation with an increase in the amount of load and the corresponding stages of the penetration of a typical indenter, h penetration depth of indenter)

Sertlik deneyleri basit ve tahribatsız deneyler olduğundan, numunenin diğer özellikleri hakkında, numuneye zarar vermeden bir fikir edinilebilir. Daha sonra numune üzerinde diğer deneyler yapılabilir.

Numunelere uygulanan sertlik ölçme yöntemleri:

- Mohs sertlik ölçme yöntemi,
- Brinell sertlik ölçme yöntemi,
- Rockwell sertlik ölçme yöntemi,
- Vickers sertlik ölçme yöntemi,
- Shore Sertlik ölçme yöntemi
- Knoop Sertlik ölçme yöntemi,

Sertlik ölçmeleri yapılırken kullanılan ölçme yöntemi ne olursa olsun, numunelerin üzerinde yeterli sayıda ölçme yapılarak ortalama bir değer elde edilmesi gerekir. Yapılan sertlik ölçümlerindeki değerler birbirinden çok farklı ise, farklı değer ortalamaya dâhil edilmeyip bu farkın mevcudiyeti mutlaka belirtilmelidir[1].

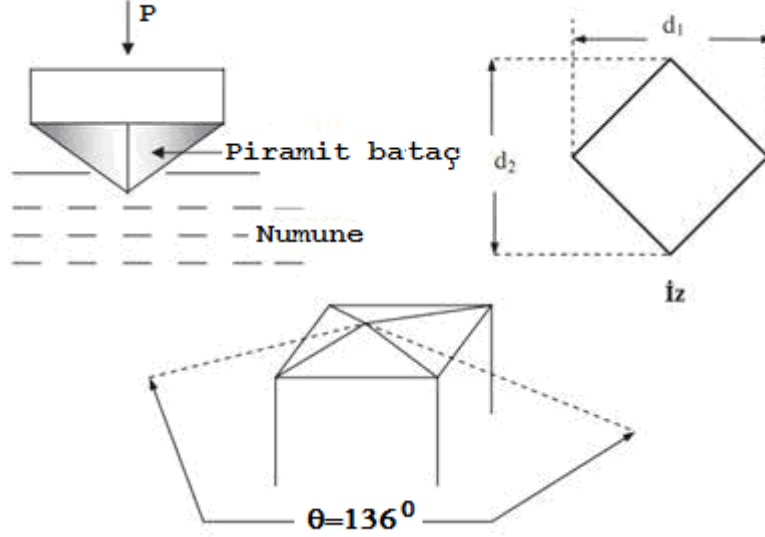
Yukarıda belirtilen sertlik ölçüm yöntemlerinden elde edilen sertlik değerleri bir birine dönüştürülebilir[4]

2. VICKERS SERTLİĞİ (VICKERS HARDNESS)

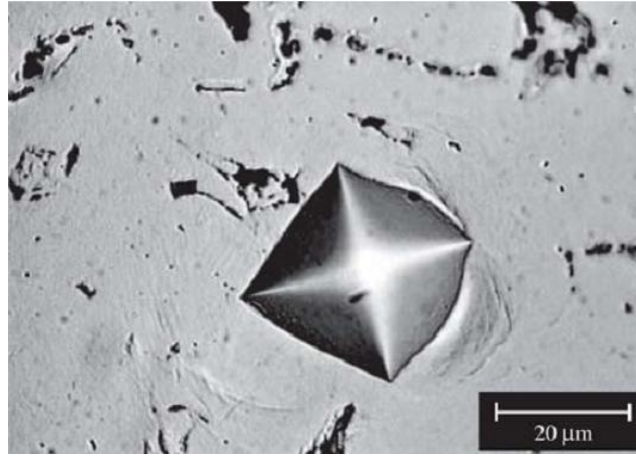
Vickers sertliğinde batac olarak kare şekilli elmas piramit kullanılır. Piramidin ters yüzleri arasındaki açı 136° 'dir. Bu açı Brinell sertlik testinde iz çapının top çapına oranının alınmasında oldukça uygun bir yaklaşım olmasından dolayıdır. Çünkü batacın şekli genellikle elmas-pramit sertlik testi olarak adlandırılır. Elmas-pramid sertlik sayısı (DPH) veya Vickers sertlik sayısı (VSS), uygulanan yükün izin oluşturduğu yüzey alanına bölümü olarak tanımlanır. Pratikte bu alan mikroskop altında baskının köşegen uzunluğunun ölçülmesiyle hesaplanır. VSS Şekil 2'de gösterilen batacın geometrik özelliklerin kullanılmasıyla hesaplanır[5];

$$VSS = \frac{2P \sin(\theta/2)}{d^2} \cong \frac{1.854P}{d^2} \quad (1)$$

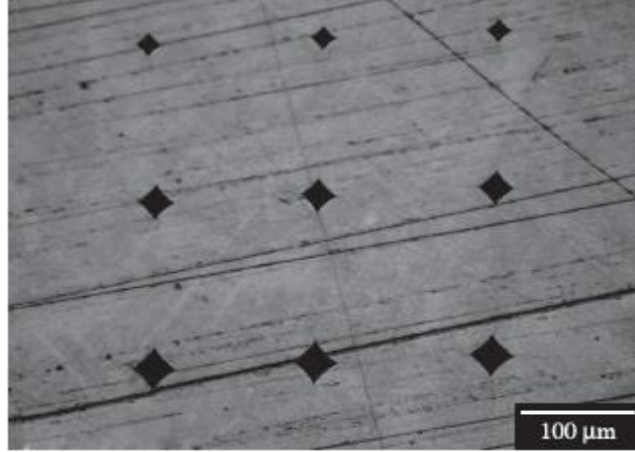
burada, P, uygulanan yük(kg); d, köşegenel ortalama uzunluk(mm); θ , elmasın ters yüzü arasındaki açı($\theta=136^\circ$)'dır.



Şekil 2. Vickers sertlik ölçümünde kullanılan bataç [6]
(Figure 2. Indenter for the Vickers hardness measurement)



Şekil 3. Alüminyum için optik olarak belirlenen Vickers sertlik iz görünümü, Yük 255 mN [7]
(Figure 3. Optically determined imprints of impression on top of aluminum sample, Load=255 mN)



Şekil 4. Batacın farklı boyutlardaki optik olarak belirlenen izleri[8]
(Figure 4. Optically determined imprints of the indenter with
different size)

Vickers sertlik testinin araştırmacılar tarafından yanlış olarak kullanılması sebebi pek çok yumuşak metal için verilen bir yük için DPH değeri 5 ile oldukça sert numuneler için DPH değeri 1500 aralığında sürekli bir sertlik ölçeği vermesindedir. Rockwell sertlik testi veya Brinell sertlik testi genellikle sertlik ölçeğindeki aynı noktada yükün veya batacın değiştirilmesini gerektirir, bu yüzden ölçeğin uç noktalarında bunlarla tamamen karşılaştırılmaz. Çünkü batacın piramidin oluşturduğu etki, onların büyüklüğü ile ilişkili olmayan benzer bir geometriye sahiptir. Burada DPH yükten bağımsızdır. Bu durum hafif yüklerin dışında genel olarak bulunabilir. Test edilecek metalin sertliğine bağlı olarak uygulanacak yük genellikle 1kg ile 120kg aralığındadır. Bu avantajlarına rağmen Vickers sertlik testi henüz yaygın olarak kullanılan rutin bir test değildir çünkü yavaş, numune yüzeyinin dikkatli hazırlanmasını gerektirir ve köşegen boyut ölçümünü yapan kişinin oldukça dikkatli ölçümler yapması gerekir[5].

3. SERTLİK VE SÜPERİLETKEN SERAMİKLER (HARDNESS AND SUPERCONDUCTING CERAMICS)

BiPbSrCaCuO bileşiklerinin yüksek kritik sıcaklığa sahip olmasından dolayı çok sayıda teorik ve deneysel çalışmanın konusu olmuştur[9-16]. Süperiletken materyallerin teknolojiye uygulanmasında, bu materyallerin mekanik özellikleri de süperiletken özellikleri kadar önem taşır.

Süperiletken tel ve şeritler taşıdıkları akıma etki eden elektromanyetik kuvvetlerin etkisi, kullanım alanına göre bu numunelerin tasarımından kaynaklanan mekanik basınç gibi pratik sebeplerden kaynaklanan mekanik stress altında kalırlar. Dolayısıyla BiPbSrCaCuO seramik bileşiği gibi oldukça kırılğan külçe yapısına sahip birçok numune ile yapılacak tel ya da şeritlerin dayanıklılığı ve çeşitli kuvvet ve basınçlar altında gösterceği mekanik davranışlarının önceden kestirilmesi mühendislik bakımından son derece önemlidir.

Süperiletken tel ve şeritlerin hem mekanik özelliklerini, hem de süperiletken özelliklerini etkileyen bu materyallerin kristal yapısındaki kusurlar bu materyallerin üretim aşamalarının da kaçınılmaz bir yan ürünü olarak ortaya çıkarlar. Örneğin, bu kristal kusurlar, üretim aşamasında şerit haline getirme esnasında materyale uygulanan basınçla ve ısıl işleminden geçme aşamasında oluşurlar. Dolayısıyla, süperiletken numunelerin üretiminden kaynaklanan, bu numunelerin süperiletkenlik özelliklerini etkileyen ve de pratik uygulamalardaki performanslarını belirleyen mekanik özelliklerinin

araştırılması oldukça önemli olmasına rağmen gerekli ilgiyi görmemiştir. Özellikle teknolojiye birçok alanda kullanılan kırılma-seramik, yüksek sıcaklık süperiletken parçalar içeren cihazların çalışma güvenliği, kullanım ömrü ve tasarımı bakımından bu numunelerin elastik ve plastik özellikleri henüz popüler olmamış bir araştırma alanıdır.

Süperiletken numunelerin mekanik özelliklerinin incelenmesinde pratik öneme sahip başka bir durum da bu numunelerde oluşan deformasyon, çatlaklar ve bu numunelerin kristal yapı kusurları ile bu numunelerin süperiletken ve normal fazlardaki elektromanyetik özelliklerinin nasıl değiştiğinin araştırılmasıdır [17,18].

Bu çalışmanın konusunu yüksek sıcaklık süperiletkeni olan BiPbSrCaCuO seramik külçe numunelerin sertlik özelliklerinin Zn ilavesine bağlı olarak değişiminin oda sıcaklığında incelenmesini oluşturmaktadır. Sertlik ölçüm metodu olarak metal ve seramik gibi numunelerin mekanik özelliklerini araştırmada oldukça yaygın kullanılan makrosertlik bilgilerinin elde edilebildiği Vickers sertlik testi kullanılmıştır.

4. MİKROSERTLİĞİN ÖLÇÜMÜ (MEASUREMENT OF MICROHARDNESS)

Deneyde, Future-Tech FM-700 series marka dijital-mikrosertlik test cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz aynı zamanda kullanılan problemleri değiştirilerek; Vickers sertliği(HV), Brinell sertliği(HB) ve Knoop Sertliği(HK) testleri, kırılma sertliği testlerini de yapabileceği özelliğine sahiptir. Cihaz, teste kullanılan ucu (HB için küre, HV ve HK için piramit şeklinde) numuneye, otomatik olarak, $50\mu\text{ms}^{-1}$ hızıyla tatbik etmektedir. Ayrıca 10gr ~1000gr arasında değişen büyüklükler de yük uygulayabilmektedir. Yükün numuneye uygulanma süresi 5s ~ 99s aralığında değişmektedir. Uzunluk ölçümlerini ise %5 hassasiyette optik olarak yapmaktadır. Maksimum $\times 50$ büyütülmüş değerlerinde objektiflerle fotoğraf çekebilme özelliklerine sahiptir ve veriler doğrudan bilgisayar ortamına aktarılabilir. Uzunluk ölçümleri $\sim\mu\text{m}$ seviyesinde olduğundan uzunluk ölçümü optik düzeneğe olur, $\sim\text{nm}$ seviyesinde iz oluşturan sertlik testlerinde ise SEM (Scanning Electron Microscopy) kullanılmaktadır[19].

Deneyde kullanılan Vickers sertlik ölçüm aracı ve deneyde kullanılan süperiletken numuneler Şekil 5'de gösterilmektedir.



Şekil 5. %Zn ilaveli tablet biçimli numunelerden birine ait Vickers Sertlik ölçüm yapılıırken görünümü[20]

(Figure 5. View of the measurement device during the measurement of the Vickers hardness of one of the sample pellets)

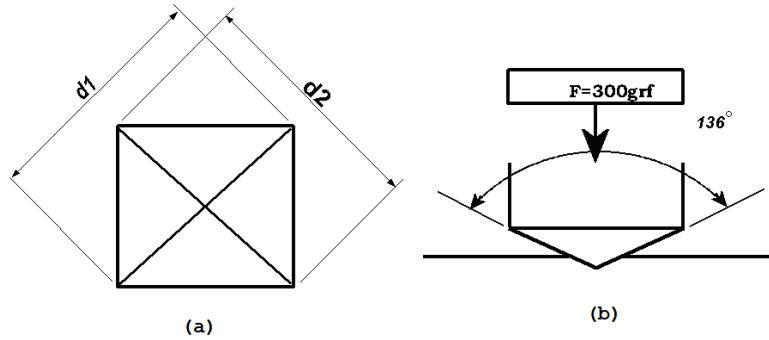


Şekil 6. % Zn ilaveli BiPbSrCaCuO tabletler[20]
(Figure 6. Pellets of added Zn% in to BiPbSrCaCuO)



Şekil 7. Ölçümlerde kullanılan Vickers Sertlik cihazı[21].
(Figure 7. Device used in the measurement of the Vickers hardness)

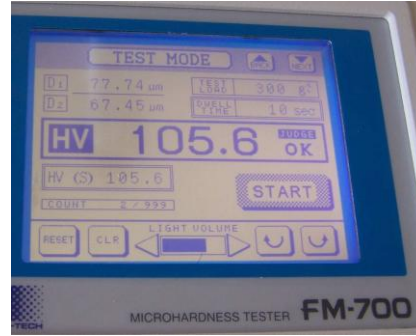
Future-Tech FM-700 Series markalı dijital mikrosertlik cihazı kullanıma hazırlandıktan sonra ölçümü yapılacak olan BiPbSrCaCuO süperiletken tablet ölçüm cihazının alt tablasına sabit duracak şekilde yerleştirildikten sonra seçilen en küçük yük miktarı ile bu yük miktarı belirli oranlarda artırılarak numune için uygun olan yük miktarı tesbit edilmiştir.



Şekil 8. İze ait d_1 ve d_2 uzunluklarının ve batacın oluşturduğu izin üstten(a), yandan(b)şematik görünümü [20]
(Figure 8. Schematic Top (a)and side(b) views of indentation and the lengths d_1 and d_2 belonging to an indent)

Numune için uygun olan yük miktarının belirlenmesi sonrasında numune yüzeyinde farklı beş nokta belirlenerek mikrosertlik cihazının

uygun değerlere ayarlamasıyla yük uygulanmıştır. Uygulanan yükün numuneye yaklaşık olarak 10s kadar etki etmesi sağlanmıştır. Daha sonra yükün etkisi ortadan kaldırılarak numune yüzeyinde oluşturmuş olduğu köşegen izleri ile ilgili optik ölçüm aşamasına geçilmiştir. Köşegen iz ölçümü %5 hassasiyetindeki mikroskop yardımıyla yapılmıştır. Bu da deneyin yapılışı sırasında oluşan hem sistematik hem de aletsel (systematic and instrumental errors)hata kaynaklarından birisini oluşturmaktadır. Bunun için mikroskoptan elde edilen, d_1 ve d_2 ile gösterilen köşegen uzunlukları kullanılarak bu uzunlukların aritmetik ortalamalarının alınmasıyla elde edilen d uzunluğu eşitlik 1'de yerine konularak mikrosertlik değerleri belirlenmiştir. Deneysel karşılaştırmalarda doğacak hataları en aza indirmek için 300gr' lık yük sertlik ölçümünde numunelerin tamamında sabit değer olarak uygulandı. Deney laboratuvar sıcaklığında gerçekleştirildi.



Şekil 9. Vickers sertlik test cihazının ekran görünümü[20].
(Figure 9. A picture of the screen of the Vickers hardness testing device)

Deneyin yapılması ve verilerin alınması sırasında oluşan sistematik hata kaynaklarından bir tanesi de numunelerin yüzeyinin temizliğidir. Deneyde hem numunelerin az olması hem de alınan verilerin sayılarının az olmasından dolayı deneyde oluşan rastgele deney hatalarını (random errors) deney sonuçlarından çıkarmak mümkün olmamaktadır. Bununla birlikte özellikle belirtmek gerekir ki, deneydeki sistematik hatalardan en büyüğü d_1 ve d_2 uzunluklarının optik olarak ölçülmesinden kaynaklanmaktadır. Ölçümü yapılan Şekil 6'da görülen numunelerin siyah renkte olmaları d_1 ve d_2 iz uzunluklarının ölçülmesini güçleştiren başka bir etkendir. Bunun bir sebebi de numune üzerindeki dikdörtgen izlerin köşegen uzunluklarının mikroskopla ölçülerek optik olarak araştırmacı tarafından tespit edilerek cihaza kaydedilmesidir. Dolayısıyla, uzunluk ölçümlerindeki sistematik hatanın bir kaynağı da bu uzunlukları mikroskoptaki görüntülerine bakarak cihaza kaydeden araştırmacının görme keskinliği olabilmektedir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSIONS)

Deneyde Vickers sertlik testi yapılan değişik molar oranda Zn katkısı içeren süperiletken BiPbSrCaCuO külçe numuneler, Amonyum Nitrat Metodu ile üretilmiştir.

Üretim aşamalarının ve katkı işlemlerinin detaylı açıklaması kaynak[9]'de verilmektedir. İncelemesi yapılan numuneler sırasıyla %3, 5, 8, 10, 20, 30, 50 Zn molar katkısı ile Z3, Z5, Z8, Z10, Z20, Z30 ve Z50 olarak adlandırılmıştır.

Deneysel verilerle elde edilen numunelerin sertlik derecesi aslında, üretim aşamaları sırasında numunelerin geçirdiği ısıl işlemler sırasında oluşan çeşitli tipte dislokasyonlar gibi, kristal kusurlarının tabletler üzerindeki yoğunluğunun ve bu kusurların hareket kabiliyetlerinin bir ölçüsüdür. BiPbSrCaCuO seramikleri sert

bir numune olmamasına rağmen üretim metodu numunenin daha sert olmasına sebep olabilmektedir.

Yüksek sıcaklık süperiletkeni olan BiPbSrCaCuO sıvı azot ortamında süperiletken fazdadır. BiPbSrCaCuO süperiletkenine yapılan Zn katkısı, 108 K'lık kritik sıcaklığa sahip Bi-2223 fazından ziyade 95 K'lık kritik sıcaklığa sahip Bi-2212 fazının yapıda baskın olmasına sebep olmaktadır[22].

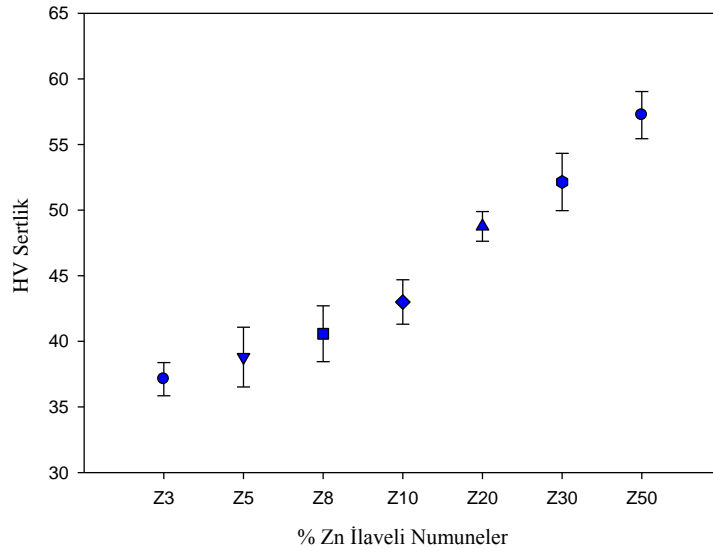
5. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Deneyde elde edilen veriler Çizelge 1'de verilmektedir[21]. Deneysel verilerin HV-%Zn grafiği ise Şekil 10'da görülmektedir.

Tablo 1. 300gr sabit yükün numunelere uygulanarak ölçülen sertlik verileri

(Table 1. Hardness data obtained by applying 300g of load to the samples)

Zn katkılı (% molar) numune	HV Maksimum	HV Minimum	HV Ortalama	HV Standart sapma
Z3	38.5	35.5	37.12	1.265
Z5	42.25	36.5	38.80	2.280
Z8	43.2	37.9	40.58	2.125
Z10	45.5	41.0	43.0	1.695
Z20	50.3	47.5	48.76	1.134
Z30	54.6	48.8	52.14	2.184
Z50	59.0	54.5	57.24	1.799



Şekil 10. Vickers Sertliğinin % Zn katkısı ile değişimi.
(Figure 10. Change of Vickers hardness with the addition of % Zn)

HV-%Zn grafiğinden de görüleceği gibi, Z3, Z5, Z8 oranlarında sertlik dereceleri oldukça geniş bir aralıkta değişim göstermektedir. Katkı miktarı düşük numunenin sertliğinin katkı yapılmamış numuneye yakın olması bekleneceğinden, bunun sebebi BiPbSrCaCuO yapısı içerisinde Zn katkısının yeterince homojen dağılmamış olduğundan kaynaklanabileceği beklenir. Z10, Z20, Z30, Z50 oranlarında yapılan Zn ilavelerinin BiPbSrCaCuO yapısı içerisinde sertliği etkileyecek oranda olduğu görülmektedir. Bununla birlikte sertlik derecesinin Zn katkısı ile birlikte arttığı da HV-%Zn grafiğinin incelenmesinden elde edilebilir. Bu deneysel sonuçlar benzer başka araştırmalarda da elde edilen sonuçlarla uyum içerisindedir. Örneğin oda sıcaklığında, YBCO

süperiletkeninde Zn konsatrasyonu ile numunenin Vickers mikrosertlik derecesinin arttığı tespit edilmiştir[10-12].

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Boyer, H.E., Hardness Testing, ASM International Metals Park, Ohio, 44073, ISBN: 0-87170-244-4.
2. Rovira, D.J.J.R., (2010). Mechanical Properties of HTSC at Micro/Nanometric Scale, Doktora tezi, University of Barcelona Faculty of Chemistry Department of Materials Science and Metallurgical Engineering, Barcelona.
3. Choi, Y., Van Vliet, K.J., Li, J., and Suresh, S., (2003). Size effects on the onset of plastic deformation during nanoindentation of thin films and patterned lines *J. Applied Physics*, 94, 9, 6050-6058.
4. <http://mdmetric.com/tech/hardnessconversion.html>(07-2011)
5. Dieter, G.E., (1961). Mechanical Metallurgy, McGraw Hill, New York Toronto London 0071004068
6. Kolemen U., Celebi S., Karal H., Ozturk A., Cevik U., Nezir S., ve Gorur O., (2004). Superconducting and Vickers hardness properties of ZnO-added YBCO polycrystalline superconductors, *Phys. Stat. Sol. (b)* 241, No. 2, 274 - 283
7. Franco A.R., Pintaúde G., Sinatoraa A., Pinedoc C.E., and Tschiptschina A.P., (2004). The Use of a Vickers Indenter in Depth Sensing Indentation for Measuring Elastic Modulus and Vickers Hardness, *Materials Research*, Vol. 7, No. 3, 483-491.
8. Chanya C., Pojjanut B., and Paitoon D., (2009). Effect of indentation load and time on Knoop and Vickers microhardness tests for enamel and dentin, *Mat. Res.*, Vol.12, No.4, pp. 473-476. ISSN 1516-1439.
9. Karaca, I., (2001). Yüksek Sıcaklık Süperiletkenlerin Üretimi ve Katkı Maddelerinin Fiziksel Özellikler Üzerine Etkisi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
10. Karaca, I., Celebi, S., Varilci A., and Malik, A.I., (2003). Effect of Ag₂O Addition on the Intergranular Properties of the Superconducting Bi(Pb)SrCaCuO System, *Superconducting Science and Technology*, Vol. 16 Issue 1, pp.100-104.
11. Kolemen, U., Celebi, S., Karal, H., Ozturk, A., Cevik, U., Nezir, S. and Gorur, O., (2003). Superconducting and Vickers hardness properties of Zn-O added YBCO polycrystalline superconductors, *Phys. Stat Sol. (b)*, No.2, pp. 273-283.
12. Kolemen, U., Celebi, S., Yoshino, Y., and Ozturk, A., (2004). Mechanical Properties of YBCO and YBCO + ZnO Polycrystalline Superconductors Using Vickers Hardness Test at Cryogenic Temperatures, *Physica C*, No. 406, pp. 20-26.
13. Yoshino, Y., Iwabuchi A., Noto K., Sakai N., and Murakami M., (2001). Vickers Hardness Properties of YBCO Bulk Superconductor at Cryogenic Temperatures, *Physica C*, 357-360, pp. 796-798.
14. Uzun, O., Kolemen, U., Celebi S., and Guclu, N., (2004). Modulus and Hardness Evaluation of Polycrystalline Superconductors by Dynamic Micro-indentation Technique, *Journal of European Ceramic Society*, No. 25, pp. 969-978.
15. Khalil, S.M., (2001). Enhancement of Superconducting and Mechanical Properties in BSCCO with Pb Additions, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, Vol. 62, No. 3, pp. 457-466.
16. Ibrahim M.M., Khalil, S.M., and Ahmed, A.M., (2000). Effect of Pb addition on Thermoelectric and Microhardness of Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O Superconductors, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, Vol. 61, No. 5, pp. 1553-1560.

17. Oduleye, O.O., Penn S.J., and McN Alford N., (1998). The Mechanical Properties of (Bi-Pb)SrCaCuO, Superconducting Science and Technology, Vol. 11, Issue 9, pp.858-865.
18. Gurevich A. and McDonald J., (1998). Nonlinear Current Flow Around Defects in Superconductors, Physical Review Letters, Vol. 81, pp. 2546-2549.
19. Bangert, H., Kaminitschek, A., and Wagendristel, A. (1993). Hardness Measurements in a SEM as a Quality Test for Thin Films, Microelectronics International, Vol. 3 Iss: 3, pp.15 - 17
20. Baykal, M., (2007). Zn İlavesine Bağlı Olarak BiPbSrCaCuO Süperiletkeninin Sertlik Özelliğinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
21. <http://www.ft-hardness.com/en/product/fm.html>. (07-2011)
22. Karaca, İ., Çelebi, S., Kölemen, U. ve Öztürk, A., (2001). Amonyum Nitrat Yöntemi ile Üretilen Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O Süperiletken Yapıya Zn İlavesinin Etkisinin X-Işını Kırınım Desenleri ve Mikroyapı Analizi, II. Ulusal Yüksek Sıcaklık Süperiletkenler Sempozyumu, İnönü Üniversitesi, Malatya, Ref.No: M18.